

ヒートポンプレス下水熱融雪施設における 下水熱の有効利用に関する研究

小酒欽弥、藤野丈志*¹、中井健司、氏江勇貴*²、坂田雅彦、清水淳*³、深谷渉*⁴

1. はじめに

下水熱は、下水道管渠ネットワークを通じて都市に存在する未利用エネルギーである。気温と比べると季節間の温度変化が小さく、多くの下水道施設が整備されている都市部において、夏期は冷熱、冬期は温熱の有効な熱源として期待されている。以前は法律によって公共に限られていた下水熱利用だが、平成 23 年 4 月の「都市再生特別措置法」の改正¹⁾や平成 24 年 8 月の「都市の低炭素化の促進に関する法律」の成立²⁾によって規制緩和が進み、熱利用を目的とした下水の活用が民間でも可能となった。これにより、近年は市町村や民間企業でも独自の採熱技術の研究開発が進められている。

本研究は、国土交通省が平成 28 年度下水道革新的実証事業 (B-DASH プロジェクト) の予備調査として実施した「下水熱を利用した車道融雪技術」の採択事業のうち、(株)興和・積水化学工業(株)・新潟市が共同研究体として実施したものである。

2. システムの特長

ヒートポンプレス下水熱融雪システムの概要を図-1 に示す。下水熱を利用する場合、ヒートポンプを用いることが一般的であるが、研究システムはヒートポンプを用いず、循環ポンプのみで管底に設置した採熱管と下水で熱交換したブライン (不凍液) を直接放熱パネルに循環して融雪するのが特長である。ここでは、「管底設置型下水熱交換方式融雪システム」と呼ぶ。

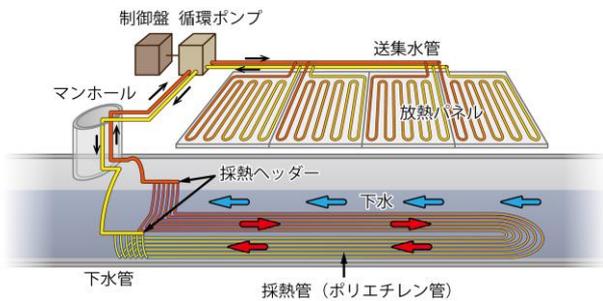


図-1 管底設置型下水熱交換方式融雪システム

3. 研究テーマ

本研究は、下水熱を車道融雪に有効活用するシステムを構築することを目的に、表-1に示すテーマで実施した。

ここでは、本テーマのうち、舗装性能および採熱性能の研究について報告するほか、本研究成果を適用した場合の試算結果として、ブライン温度、放熱量、適用可能エリア、SCOP、電力削減量についても報告する。

表-1 研究テーマと目標

研究テーマ	目標
1)舗装性能	車道に適する舗装の熱性能を向上させ、放熱能力の効率化を図る。
2)採熱性能	下水内に設置する採熱管の熱性能を向上させ、採熱能力の効率化を図る。
3)制御効率	合流式下水道で下水温度が低下しても、制御によって熱利用の効率化を図る。
4)事業計画	管理者が異なる施設でも円滑に運営するためのポイントを整理する。

4. 研究方法

4. 1 実施方針

一般に、融雪設備におけるブライン温度は、各地の気象条件と舗装の熱伝導率、ブラインを循環させる放熱管の敷設間隔によって決定する³⁾。本研究の計算では、一般的なコンクリート舗装 (熱伝導率 1.6 W/m/°C) を用いた場合、車道融雪に必要なブライン温度は 7.7~13.5°C程度が必要となる。一方、新潟市がバスターミナルの歩道に設置した管底設置型下水熱融雪施設 (以下、パイロット施設) における 1 月、2 月の下水温度は 8~12°Cを推移し、車道融雪に必要なブライン温度と同等か、やや低い温度であった。

ヒートポンプレスで下水を熱源として使用するためには、低いブライン温度でも融雪能力が確保できるようにすることが必要である。そこで、本研究は舗装の熱性能 (熱伝導率) の向上と、効率良く下水と熱交換するために採熱管の熱性能 (総括熱伝達係数) を向上させることを主眼に研究を進めることとした。

4. 2 舗装の熱性能研究

舗装は車道用の融雪では一般的に用いられることが多いコンクリート舗装を主な研究対象とした。表-2に一般的なコンクリート舗装におけるセメント、水、細骨材、粗骨材、混和剤の重量と骨材の重量割合を示した。舗装のなかで骨材は、全重量の70%以上を占めることから、骨材に着目して研究を進めた。

* 1 株式会社興和 水工部 (TEL 025-281-8816)

* 2 積水化学工業株式会社、* 3 新潟市、* 4 国土技術政策総合研究所

表-2 コンクリート舗装における骨材比率の例

配合項目	現場打ち	RC版舗装
配合呼び方	4.5-6.5-25BB	5.9-12-13 早強
セメント(A)	14.04 kg	14.43 kg
水(B)	5.53 kg	4.62 kg
細骨材(C)	25.32 kg	18.81 kg
粗骨材(D)	47.32 kg	31.65 kg
混和剤(E)	0.14 kg	0.993 kg
総重量(F)	92.35kg	70.503kg
骨材比率 (%)	78.6%	71.5%
※(C+D)÷F		

表-3 に本研究で調べたコンクリート舗装における骨材産地を示す。骨材は地域に産出する砂利・碎石等を使用していることが分かる。これらの骨材に使われている骨材は、主に花崗岩・砂岩が主体であった。これらの骨材の熱伝導率は、 $1.5\sim 2.6 \text{ W/m}\cdot\text{K}^{\text{④}}$ とされており、コンクリート舗装の $1.4\sim 1.8 \text{ W/m}\cdot\text{K}^{\text{③}}$ とほぼ同等か、やや高い程度である。

表-3 コンクリート舗装の主な骨材産地例

供給地域	骨材調達地域	骨材種類
青森県	北海道北斗市	碎石
新潟県下越地区1	新潟県阿賀野市	陸砂利
新潟県下越地区2	新潟県村上市	陸砂利
富山県	富山県富山市他	陸・川砂利
石川県	富山県南砺市	陸砂利
福井県	福井県坂井市	陸砂利

そこで本研究では、所有鉱山が自ら測定した熱伝導率が $6.0 \text{ W/m}\cdot\text{C}$ ある珪石を使用し、舗装サンプル（以下、研究舗装）を作成した。サンプルは、通常の骨材を用いた舗装（以下、普通舗装）を11種類、研究舗装を7種類作成し、最初に表-4 に示す車道舗装としての強度性能を確認した。

表-4 舗装の強度性能の確認項目

確認項目	舗装基準値（基準書等）
曲げ強度試験 （現場打コンクリート）	曲げ強度が 4.5 MPa を上回る。 （JIS A5308）
曲げ強度試験 （プレキャスト製品）	曲げ強度が 5.9 MPa を上回る。 （プレキャストRC版舗装協会基準）
マンホール安定度試験 （アスファルト）	空隙率、飽和度、安定度、フローが基準値内であること。（舗装設計便覧）

その後、円板熱流計法（ASTME1530 に準拠した手法）に基づき、作成した舗装サンプルの熱伝導率測定を行った。使用した測定機器およびサンプルを写真-1 に示す。測定は、片面から熱負荷を与え、もう片面の温度が安定するのを待つ方法である。熱伝導率は、安定したときの熱負

荷量と試料の厚みから求めることができる。サンプルは、写真-1 に示す厚さ 3 cm 、直径 5 cm に加工したものを1種類あたり3試料用意して実施した。



写真-1 舗装の熱伝導率測定機器とサンプル例
（左：測定機器、右：舗装サンプル）

4. 3 採熱管の熱性能研究

採熱管は、パイロット施設に用いた採熱管（以下、既存採熱管）と高熱伝導材料を用いた採熱管（以下、研究採熱管）を製作し、下水管内への敷設確認として表-5 に示す耐久性能試験を実施した。その後、写真-2 に示す模擬試験管路を用いて熱性能試験を行った。

表-5 採熱管の耐久性能の確認項目

確認項目	基準値（基準書等）
耐薬品性試験	質量変化度が $\pm 0.2 \text{ mg/cm}^2$ 以下。 （JSWAS K-14）
耐摩耗性試験	プラスチック-摩耗輪による摩耗試験で下水道用硬質塩化ビニル管と同程度の耐摩耗性を有する（JSWAS-1）
水密性試験	採熱管に 1.5 MPa の内水圧を負荷し、3分間保持して漏水しない（※既存管の建設技術審査証明書基準と同等）



写真-2 模擬試験管路

試験は、外側管路に模擬下水、内側管路に模擬ラインを循環させ、試験装置出入り口の温度と流量を測定し、採熱管の総括熱伝達係数を算出する。本研究における総括熱伝達係数の算出式を式-1 に示す。総括熱伝達係数は、管の単位表面積・単位温度差あたりの熱交換量を示すも

のである。試験では、採熱管単体での総括熱伝達係数の測定のほか、実際に下水管底に設置した状態と同じ模擬フレームを嵌合させた場合の総括熱伝達係数も測定して運用時の低減率の測定を行った。

$$U = \frac{Q}{A \times \Delta T} \quad (\text{式-1})$$

U : 総括熱伝達係数 (kW/m²・K)

Q : 交換熱量 (kW)

A : 採熱管接触面積 (m²)

ΔT : 対数平均温度差 (K)

$$\Delta T = \frac{((T_2 - t_2) - (T_1 - t_1))}{\ln((T_2 - t_2) - (T_1 - t_1))}$$

T₁ : 模擬下水行き温度 (°C)

T₂ : 模擬下水戻り温度 (°C)

t₁ : 模擬ブライン行き温度 (°C)

t₂ : 模擬ブライン戻り温度 (°C)

5. 研究成果

5. 1 舗装性能

舗装の熱性能の測定結果を図-2 に示す。普通舗装の熱伝導率は、全サンプル平均で 1.90 W/m・K (最小 1.63、最大 2.25) であったのに対し、研究舗装の熱伝導率は 2.48 W/m・K (最小 2.19、最大 2.67) となり、熱性能が 30%向上する結果が得られた。

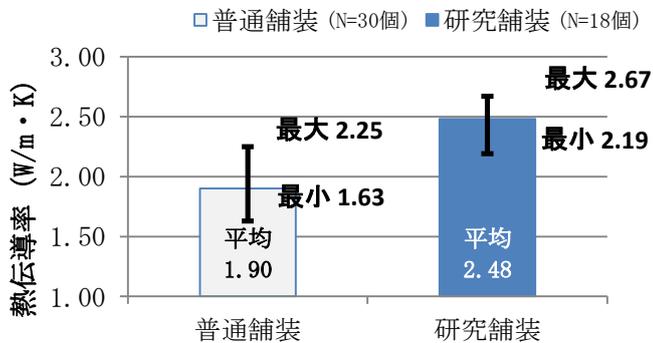


図-2 舗装の熱性能測定結果

5. 2 採熱性能

採熱管の熱性能の測定結果を表-6 に示す。既存採熱管の総括熱伝達係数が 0.07 kW/m²・K に対し、研究採熱管は 0.09 kW/m²・K となり、熱性能が 29%向上する結果が得られた。

表-6 採熱管の熱性能測定結果

サンプル種類	総括熱伝達係数 (kW/m ² ・K)
研究採熱管	0.09
既存採熱管	0.07

6. 研究成果適用による試算結果

6. 1 ブライン温度

路面消・融雪施設等設計要領³⁾の算定式より、ブライン温度を試算した結果を表-7 に示す。研究舗装は、普通舗装に比べてブライン温度を 1.6-3.9°C 低減できる試算結果となった。

表-7 ブライン温度の低減効果試算結果

モデル都市	放熱量 (W/m ²)	ブライン温度 (°C) ※2		温度差 (°C)
		普通舗装	研究舗装	
新潟	123	7.7	6.1	1.6
青森	160	10.0	7.8	2.2
札幌	204	13.5	11.0	2.5
札幌 2※1	291	19.0	15.1	3.9

※1 札幌市が電熱ヒーター以外の融雪方式に求める設計熱量例

※2 放熱パネルの入口部分での温度 (7.2 m²/パネル時の試算例)

6. 2 放熱能力

研究舗装と研究採熱管を組み合わせたものを研究システム、普通舗装と既存採熱管を組み合わせたものを既存システムとし、下水温度条件を 8.5°C から 12.0°C とした場合の可能放熱量を試算した。その結果、図-3 に示すとおり、研究システムは既存システムと比べて約 30% 放熱量が向上する試算結果が得られた。



図-3 下水温度別*の放熱量試算結果

*各地の処理場における下水温度より設定

6. 3 適用可能エリア

図-3 の試算放熱量と路面消・融雪施設等設計要領³⁾の算定式に基づき算出した各地の設計放熱量を比較した結果を表-8 に示す。下水温度条件によるものの、既存システムで適用困難であった札幌・函館・十日町などの地域も研究システムの採用により、ヒートポンプで融雪できる可能性があることが試算結果より明らかとなった。

表-8 適用可能エリアの試算結果例

都市	必要熱量 ^{※1} (W/m ²)	適否判定	
		既存システム	研究システム
新潟	123	◎	◎
青森	160	○	◎
富山	167	○	◎
札幌	204	×	○
函館	222	×	△
十日町	228	×	△

※1 路面消・融雪施設等設計要領³⁾にしたがい、試算した熱量

※2 下水温度 ◎: 8.5°C、○: 10°C、△: 12°C、×: 不適

6. 4 システム規模試算結果

既存システムと研究システムで都市の必要熱量に応じた採熱長から算出できる循環ポンプ出力を整理した結果を表-9に示す。既存システムで試算すると、札幌市は適用困難、青森市で3.7 kW、新潟市で2.2 kWの循環ポンプが必要であった。研究システムで試算すると、札幌市で3.7 kW、青森市で2.2 kW、新潟市で1.5 kWとなった。

表-9 都市別の循環ポンプ規格試算例^{※1}

対象都市	対象面積 (m ²)	必要熱量 (kW)	下水管径 (採熱管数)	採熱長(m) ^{※2}	ポンプ規格 ^{※2}
札幌市	110	22.4	Φ1000 (14本)	67.0 (対応不可)	Φ40-3.7kW (-)
青森市		17.6		32.2 (75.0)	Φ40-2.2kW (3.7kW)
新潟市		13.5		19.2 (33.2)	Φ40-1.5kW (2.2kW)

※1 融雪面積110m²、下水温度12°Cを想定した試算

※2 採熱長、ポンプ規格=上段: 研究システム、下段 () 内: 既存システム

6. 5 SCOP

必要熱量とポンプ規格から算出したSCOPの比較結果を図-4に示す。研究システムにより、SCOPは札幌市で6.0、青森市で8.0、新潟市で9.0を期待できる結果となった。また、既存システムと比較すると札幌市では適用できなかったものが適用できるようになり、他の都市においてもSCOPが2.9~3.3向上する試算結果が得られた。

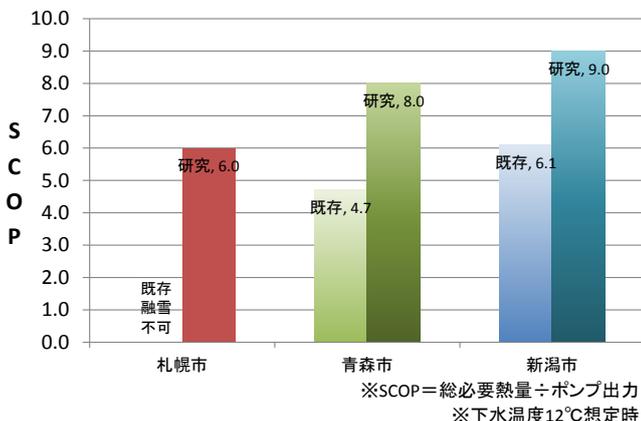


図-4 都市別のSCOP試算結果比較

6. 6 電力削減量

循環ポンプ規格を試算した110m²規模で新潟市を想定し、年間1000時間の運転を行った場合の電熱ヒーティング方式と研究システムの使用電力量の試算結果を図-5に示す。電熱ヒーティング方式に比べ、研究システムは12,000 kWhの電力を削減できる結果が得られた。

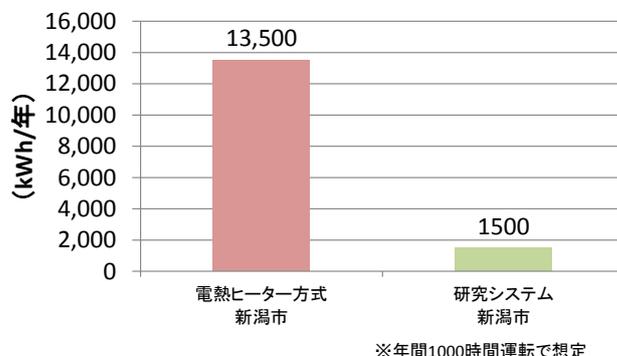


図-5 使用電力量の試算結果

7. おわりに

本研究の結果、舗装および採熱ともに高熱伝導素材を用いることで熱性能の向上が図られ、ヒートポンプレスの下水熱融雪施設の適用範囲が広がり、電力使用量も大幅に削減できる可能性を示すことができた。

今後は本システムを実フィールドに適用し、研究成果の検証を進めていきたい。また、下水熱を利用した融雪施設は設置数が少ないため、本成果を活用して普及拡大に繋げていきたいと考える。

- 国土交通省・発表資料(2011.2.8): 都市再生特別措置法の一部を改正する法律案について
http://www.mlit.go.jp/report/press/city05_hh_000033.html
- 国土交通省・都市の低炭素化の促進に関する法律(略称: エコまち法)
http://www.mlit.go.jp/toshi/city_plan/eco-machi.html
- 路面消・融雪施設等設計要領: 2008, 路面消・融雪施設等設計要領編集委員会(一般社団法人日本建設機械施工協会・北陸支部※旧: 社団法人日本建設機械化協会・北陸支部)
- 蓄熱工学1(基礎編): 1995, 関信弘(森北出版)